心理科学进展 2023, Vol. 31, No. 6, 905–914
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2023.00905

·研究构想(Conceptual Framework)·

基于生物运动的社交焦虑者情绪加工与社会意图理解负向偏差机制*

彭玉佳[1,2,3] 王愉茜[1] 路 迪[1]

([1]北京大学心理与认知科学学院; 行为与心理健康北京市重点实验室; [2]北京大学人工智能研究院, 北京 100871) ([3]北京通用人工智能研究院跨媒体通用人工智能全国重点实验室, 北京 100080)

摘 要 社交焦虑者在情绪加工和社会意图理解方面均可能存在异常, 以负向认知偏差为代表, 但目前尚缺乏针对社交焦虑的情绪与社会意图理解共性机制的研究和临床预测模型。本项目计划综合运用行为实验、功能磁共振成像和计算建模, 基于情绪识别与社会意图推理的生物运动范式, 并结合面部表情识别任务, 系统考察社交焦虑者在情绪加工和社会意图加工中的负向认知偏差机制, 并构建社交焦虑症状的预测模型, 检验精神疾病背后的多维数据关联, 以及多维数据对社交焦虑临床症状的客观分类和预测的作用。

关键词 情绪识别, 社交焦虑, 社会意图理解, 生物运动, 脑影像, 认知计算

分类号 B849

1 问题提出

社交焦虑是一种普遍的焦虑障碍, 表现为患者对于社交行为及场合的极度害怕与回避, 不仅严重影响了患者的生活质量, 同时为患者就医和寻求治疗带来了极大的阻碍, 形成一个恶性循环(Burklund et al., 2015; Stein & Stein, 2008)。社交焦虑已经成为世界第三大心理健康问题, 13%的人在一生中会被临床诊断为社交焦虑症, 长期受其折磨; 即使未达到临床水平, 几乎所有人或多或少都有过社交焦虑的体验(King, 2022)。由于精神疾病的异质性和共病性的特点, 传统依赖 DSM 和 ICD 等基于主观报告的临床诊断方法存在误诊、漏诊等局限性, 亟需研究来验证临床症状背后的神经生物学机制, 引领未来使用客观的行为及脑活动模式等指标来诊断及预测精神疾病。社交焦虑具有高度的抑郁和焦虑障碍的共病性, 是解析精神疾病共病性和异质性的有效切入点。此外, 与广泛性焦虑障碍、惊恐障碍和其他特定恐惧症不同, 社交焦虑同时兼具“具有明确应激源”与“应激过程与社会信息的认知加工密切相关”两个特征, 是探究精神疾病如何影响日常社会互动认知及生理机制的重要着力点。

社交焦虑与社会认知的异常功能密不可分(Pozo et al., 1991)。社会认知(social cognition)是个体理解、思考他人, 根据环境中的社会信息(如面孔、体态、语言)形成对他人状态推论的过程(Kennedy & Adolphs, 2012; Weightman et al., 2014)。具体而言, 社会认知包括个体对他人的心理状态、行为动机、意向等方面做出推测与判断等过程。情绪加工和意图推理两者各有侧重, 但同时密切相关, 均为社会认知中的重要维度。情绪识别指个体对于他人情绪状态的解读和判断, 如判断一个个体是愉快还是愤怒, 是在热情欢呼还是愤怒吼叫。意图推理则是指个体对他人社会意图和即将展开的行为的推断, 如判断一个个体是在向自己招手, 或是准备对准自己的脸来一巴掌。所以, 情绪和意图可以区分为在感受层面和行为层面的不同状态, 两者表现形式不尽相同, 但都可以在社会认知加工中带来威胁信号。

收稿日期: 2022-10-25
* 国家自然科学基金青年科学基金项目(32200854)。
通信作者: 彭玉佳, E-mail: yujia_peng@pku.edu.cn

社交焦虑者在情绪加工和社会意图推理方面均可能存在异常，而现存的证据专注于研究单一领域及单一数据维度，无法有效统合情绪加工和意图推理两个维度的共性机制，也无法建立基于多模态数据的社交焦虑临床预测模型。因此，系统地考察社交焦虑者的情绪识别和意图推理的负向认知偏差的共性认知神经机制，对进一步解析社交焦虑的病理学机制具有重要的理论意义。同时，基于行为与脑成像数据，构建社交焦虑症状的预测模型，并检验精神疾病背后多数据维度之间的关联，以及社交焦虑与焦虑和抑郁障碍之间的共病性，最终利用多维数据对于临床症状的客观分类和预测的作用，对推动和建立社交焦虑的客观诊断及预测标准具有重要的现实意义。

2 国内外研究现状述评

2.1 社交焦虑的认知神经机制

社交焦虑障碍背后的认知与情绪加工机制尚不明确，可能存在多种异常因素，但如图 1 所示，患者对于社会信息的负向认知偏差是社交焦虑认知与情绪加工机制的一种体现，即在处理社会信息的过程中，社交焦虑者倾向于产生负面的情绪感知和解释偏向，从而产生过度的恐惧反应(如：Chen et al., 2020; Liu et al., 2017; van Bockstaele et al., 2014)。例如，一个社交焦虑者在和别人的交流过程中，会更容易将别人不经意做出的皱眉解释成对自己的不满。大量前人研究发现了社交焦虑者对于面部表情的负向认知偏差(Claudino et al., 2019; Montagne et al., 2006; Mullins & Duke, 2004; Silvia et al., 2006)。

前人研究也在脑成像实验中验证了社交焦虑者的负向认知偏差。在情绪加工任务中，社交焦虑与威胁恐惧情绪环路的异常活动有关，主要涉及杏仁核、脑岛、海马旁回和内侧前额叶皮质等脑区(Etkin & Wager, 2007; Freitas-Ferrari et al., 2010; Hattingh et al., 2013; Stein & Stein, 2008)。比如，Etkin 和 Wager (2007)的元分析总结，社交焦虑背后存在着威胁−恐惧环路的活动异常，主要表现为双侧杏仁核和脑岛在消极情绪反应中出现显著的过激活。其中，杏仁核被普遍认为参与恐惧条件下的情绪加工和唤起，而与杏仁核存在内在连接的脑岛(Baur et al., 2013)不仅参与多种情绪加工，还涉及内感受性加工(Craig, 2009)。此外，恐惧情绪环路中分别负责情绪调控和情境感知的内侧前额叶皮质和海马旁回等区域的过激活也与社交焦虑显著相关(Freitas-Ferrari et al., 2010; Hattingh et al., 2013)。

同时，来自任务态和静息态脑成像功能连接的研究证据表明，社交焦虑也与加工社会信息的脑区异常活动有关。Gentili 等人(2009, 2016)的研究发现，在面孔识别任务中，属于默认网络的楔前叶、后扣带回和颞上沟等脑区在社交焦虑组表现出更强的激活，这些脑区也是心理理论系统的重要区域，主要负责自我状态感知、他人状态推理以及社会意义加工等。在社会情境任务中，社交焦虑者同样在属于默认网络的楔前叶和后扣带回出现异常的激活(Nakao et al., 2011)。基于静息态功能连接的研究也发现，相比于正常对照组，社交焦虑者的左侧楔前叶和内侧前额叶、右侧颞下回等的功能连接强度显著降低(Yuan et al., 2018)。综上所述，如图 2 所示，社交焦虑者相比于正常对照，不仅会在恐惧及情绪脑网络出现任务特异性激活，也在心理理论及社会认知相关脑区表现出特异性大脑活动(Brühl et al., 2014)。然

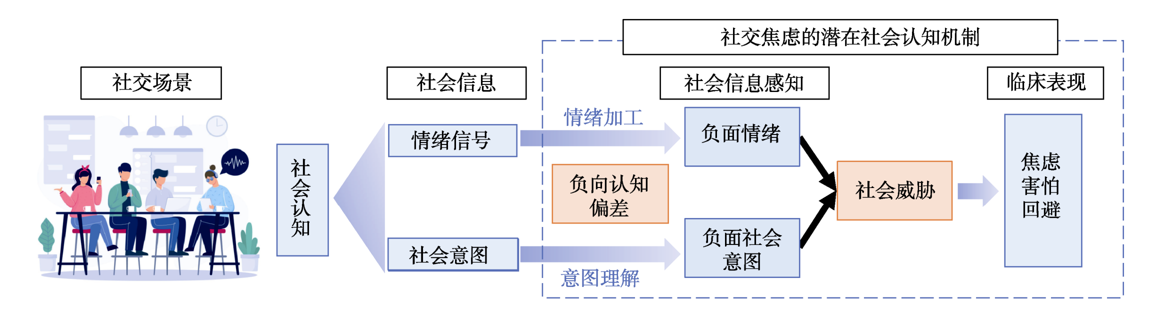


图 1 社交焦虑者加工情绪信号和社会意图的认知行为模型
注：基于 Clark & Wells, 1995; Liu et al., 2017; Rapee & Heimberg, 1997; Stein & Stein, 2008 构建。

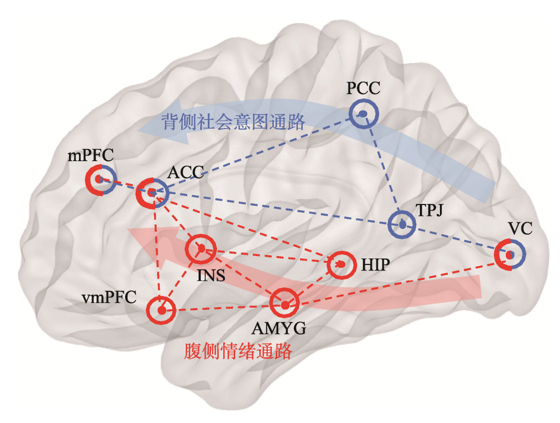


图 2　社交焦虑背后异常的情绪加工系统与社会意图理解系统的代表性脑区和神经网络示意图。mPFC: medial prefrontal cortex, 内侧前额叶皮质; ACC: anterior cingulate cortex, 前扣带回; PCC: posterior cingulate cortex, 后扣带回; TPJ: temporoparietal Junction, 颞顶联合; INS: insula, 脑岛; HIP: hippocampus, 海马体; vmPFC: ventromedial prefrontal cortex, 腹内侧前额叶皮质; AMYG: amygdala, 杏仁核; VC: visual cortex, 视觉皮层。基于 Brühl et al., 2014; Gentili et al., 2009, 2016; Hattingh et al., 2013; Ousdal et al., 2014; Palomero-Gallagher & Amunts, 2021; Pitcher & Ungerleider, 2021; Zeng et al., 2020 等研究证据构建。

而目前, 还没有研究证据有效地统合社交焦虑背后情绪与社会认知脑网络的共性机制, 即情绪加工与社会意图理解如何相互影响。同时, 我们提出一个理论假设, 社交焦虑的负向认知偏差, 可能基于双通路实现。一条腹侧情绪通路, 由视觉皮层通达边缘系统, 产生负性情绪加工; 另一条背侧社会意图通路, 由视觉皮层抵达心理理论和运动的大脑网络, 产生负性意图推理。两条通路最终汇合于前额叶, 得到对社会信息负向的认知偏向。

2.2　社交焦虑与生物运动

使用生物运动范式有助于推动社交焦虑背后情绪加工和社会意图加工的共性机制研究。在日常社会信息的表达中, 面部表情体现了重要的情绪信息。而相比于面孔, 人体生物运动(biological motion)不仅蕴含丰富的情绪信息, 同时也体现出重要且丰富的社会意图信号。一种经典的研究方法是将身体运动以光点形式呈现(point-light display, Johansson, 1973)。对于光点形式呈现的生物运动刺激, 人类无需任何学习, 就可以快速地从中提取多样的社会信息, 如身份、情绪、性别、因果关系等社会信息(Cutting & Kozlowski, 1977; Dittrich et al., 1996; Peng et al., 2017, 2020; Peng, Lu, & Johnson, 2021; Pollick et al., 2001; Thurman & Lu, 2014, 2016; Troje, 2002; Tsang, 2018)。前期研究发现, 生物运动的特异性加工与多个精神疾病相关, 如孤独症(van Boxtel et al., 2017)和精神分裂症(Keane et al., 2018)。虽然有间接的证据发现, 社交焦虑者相对于正常人, 会更多地表现出面向观察者偏向(facing-the-viewer bias), 即把模糊的生物运动刺激更多地解释为面向观察者运动(Heenan & Troje, 2015; Yiltiz & Chen, 2018)。“接近”比“远离”更具有潜在威胁(Han et al., 2021), 更强的面向观察者偏向可能表明社交焦虑障碍者对于威胁信息具有更强的敏感性。然而, 目前还没有直接的证据探究社交焦虑者是否在观察生物运动中, 体现出情绪加工及社会意图理解的负向认知偏差, 以及负向认知偏差是否可以预测更强的社交焦虑症状。

同时, 生物运动加工的神经机制涉及了社会意图理解和情绪加工等多个神经网络, 为研究社交焦虑背后的情绪与社会意图理解的共性神经机制提供了良好的基础。大量研究发现, 颞顶交界区(TPJ), 尤其是颞上沟后部(pSTS)主要参与生物运动信息加工, 该区域在生物运动识别任务中表现出稳定的激活(Grossman et al., 2000; Grossman & Blake, 2002)。随后, van Overwalle 和 Baetens (2009)的综述进一步扩充了生物运动理解的神经机制, 认为对于生物运动的理解主要由包含颞上沟后部、顶下沟前部和前运动皮层的镜像系统(mirror system)与包含楔前叶、颞顶联合区和内侧前额叶的心理理论系统(theory of mind system)构成。镜像系统通过将他人运动与自我运动相匹配从而辅助运动意图的理解, 心理理论系统负责识别和推理他人的意图。此外, 也有研究发现, 杏仁核等与情感加工相关的脑区也参与了人类运动行为的视觉分析(Chouchourelou et al., 2006)。然而, 当前生物运动识别的研究主要集中于正常人和脑损伤患者, 社交焦虑者在生物运动识别过程中是否体现异常大脑活动尚缺乏研究证据。

2.3　精神疾病与跨模态数据关联

传统的精神疾病诊断一般基于《精神障碍诊断与统计手册》或《国际疾病分类法》的标准, 依赖症状有无、数量和持续时间来分类精神疾病。由于精神疾病的共病性和异质性问题, 传统诊断方法存在误诊、漏诊、标签化等诸多问题。当今

精神疾病领域亟需研究来验证临床症状背后的神经生物学机制，以及如何使用客观的行为及脑成像指标来诊断及预测精神疾病。然而，前人的研究发现，不同测量方法(如行为实验和量表测量)和实验范式的数据之间，很难发现很强的关联性(Eisenberg et al., 2019; Frey et al., 2017)。基于行为实验和脑成像的大样本实验也发现，基于不同的行为和脑成像任务，虽然多模态数据测量都聚焦于抑郁和焦虑障碍，但不同的任务范式所得的数据很难体现出强力的跨模态相关关系(Peng, Knotts et al., 2021)。但这并不代表我们无法发现精神疾病的神经生物学标志，通过使用更为有针对性的脑成像任务，在一项纵向追踪研究中，研究结果发现了抑郁和焦虑障碍临床症状维度和大脑活动之间的预测性关联(Peng, Knotts et al., 2023)。因此，为解析精神疾病多模态数据的关联，我们亟需设计有针对性的实验范式，从多维度探究精神疾病的神经生物学机制。社交焦虑横跨情绪和社会意图的理论维度，同时生物运动范式可以便捷地测量情绪和社会意图加工过程，为实证检验精神疾病背后跨模态数据的关联提供了良好的视角。

3 简要述评

综上所述，以往的社交焦虑的相关研究已初步发现了一些情绪加工和社会意图加工中的倾向性，但存在以下局限性。

(1)大多前人研究范式关注于面部表情的加工，而忽视了同样重要的身体运动和姿态。Darwin (1872)曾在其经典著作中提出：“运动远比图片更能够体现他人的意图和情绪”。生物运动不仅包含了丰富的情绪和社会意图的信息，是社交中的重要组成部分，而且，生物运动对于社交焦虑群体可能拥有特殊的意义。由于对于社会场景的恐惧和回避，社交焦虑者可能会在社会场景回避与他人对视或直视面孔信息，而转为将注意力集中在非面孔区域。同时，在脑成像方面，多项前人研究都发现了在杏仁核上面的效应，但以往的范式由于使用面孔识别，得到的效应可能是来源于面孔加工，而非社交焦虑特异性的情绪加工或社会认知机制。同时，对于社交场景的构建，以往大多实验范式采用假想的公开发言为任务。该研究范式虽然可以触及社交焦虑，但依赖于被试的想象，无法拓展到更贴近真实生活的互动过程。采用生物运动的范式，有利于开发更加丰富的交互场景，并在未来拓展到虚拟现实的复杂互动场景。因此，社交焦虑障碍研究领域迫切需要基于生物运动和多人社会交互的范式，帮助我们深入理解社交焦虑的认知神经机制。

(2)以往研究往往局限于情绪加工，缺乏对于社交焦虑障碍背后情绪加工与社会认知共性机制的探索。情绪加工背后复杂多元的大脑机制还有待解析, Pessoa (2019)呼吁研究者关注情绪与认知的交互，而非割裂地研究单一领域。情绪加工是理解社交焦虑机制中不可忽视的重要因素，但带来社交威胁信号的因素不局限于情绪，社会意图也显著影响了我们对于社会场景的解读，并直接地影响我们的生理和行为反应。同时，已有研究证据发现情绪加工与运动加工之间的紧密关联(Portugal et al., 2020)。前人对于社交焦虑障碍研究的范式(如：面孔识别、假想社会场景)无法有效统合情绪与社会认知加工的共性机制。在本研究中，生物运动范式可以有效地填补这一空白。

(3)以往研究大多聚焦于单一数据维度，而缺乏多模态数据的整合。比如，部分研究聚焦于行为层面的社交焦虑的认知机制(如：Montagne et al., 2006; Silvia et al., 2006)，或者脑影像层面的神经基础(如：Hattingh et al., 2013; Nakao et al., 2011; Yuan et al., 2018)，既往研究缺乏对多模态数据的整合，无法检验行为、大脑活动和临床症状之间的数据关联，也无法构建基于多模态数据的对于精神疾病分类和诊断的预测模型。本研究将并行探究行为机制和脑成像机制，探索多模态数据的相关，并利用多模态数据对社交焦虑障碍进行亚型的划分和临床预测。

(4)以往研究往往聚焦于单一精神疾病类别，相对缺乏跨精神疾病诊断类别的研究。抑郁、焦虑等精神疾病类别之间存在严重的共病性问题，同时在社会意图与情绪加工过程中也存在许多共性问题(如：情绪加工如何影响社会意图感知)，这些共性也由脑影像研究得到证实(MacKinnon & Rudolf, 2003)。本研究将在解析社交焦虑认知与情绪加工机制的同时，探讨其与抑郁和焦虑障碍之间的关联。

基于上述挑战和科研重大需求，本研究计划综合运用行为实验、量表测量、脑成像技术、认知计算和机器学习，基于经典的生物运动实验范

式, 构建情绪识别和社会意图推理任务, 系统地解析社交焦虑者在情绪加工和社会认知中负向认知偏差的认知神经机制, 并剖析多模态数据和临床症状之间的关联。本研究有望引领未来基于行为和脑成像等多模态信号对精神疾病进行客观分类和预测。

4　研究构想

本项目的核心研究内容是社交焦虑者的情绪加工和社会意图理解的认知神经机制。我们将采用经典的生物运动范式, 探索临床、亚临床社交焦虑者在情绪识别和社会意图推理两个任务中的负向认知偏差。我们将结合行为实验、功能磁共振成像(fMRI)、计算建模和机器学习, 层层递进地揭示社交焦虑的认知行为与大脑机制, 及多模态数据对于社交焦虑障碍的亚型分类和预测。

研究 1 将基于经典的单人及双人生物运动范式, 并结合面部表情, 系统测试社交焦虑者的情绪识别特点。研究 2 将基于双人生物运动范式和面孔情绪识别, 探究社交焦虑者在社会意图推理中的认知神经机制。研究 3 将结合研究 1 和研究 2 的行为和脑成像数据, 探索社交焦虑者的情绪识别和社会意图推理的共性机制, 检验多模态数据之间是否具有稳健的关联性, 是否可以从多模态数据中反映社交焦虑的不同亚型, 并构建临床预测模型。我们旨在通过上述研究, 推动我国精神疾病领域的基于客观神经生物学信号的分类和诊断, 研究总体框架见图 3。

4.1　研究内容 1：社交焦虑者对于生物运动和面部表情的情绪识别

研究 1 将探究社交焦虑者的生物运动和面部表情情绪识别的认知和脑机制。本研究使用的生物运动行为实验范式基于运动捕捉, 构造以点光源生物运动形式呈现的单人及双人生物运动实验刺激。我们将从多个运动捕捉数据库中选取不同情绪的运动刺激, 如：愉快、悲伤、愤怒的走路运动, 和不同情绪类别的双人社会互动的生物运动刺激, 如：A 向 B 表达自己很高兴、很生气。本研究将同时采用经典的面部表情情绪识别范式, 通过探究对生物运动和面孔情绪识别中, 不同社交焦虑人群对不同情绪识别的准确率和反应时, 得到对各种情绪的敏感性随社交焦虑的变化曲线。此外, 如图 4 所示, 通过使用漂移扩散模型对行为数据进行建模, 进一步解析潜在的认知行为过程与社交焦虑的关系。最后, 通过 fMRI 进一步解析行为背后的脑机制, 并结合大脑信号和机器学习, 我们将基于多模态行为及脑成像数据对于社交焦虑水平进行建模和预测。

实验将招募在社交焦虑连续维度上高分和低分的被试, 同时收集相关的焦虑和抑郁指标, 进行共病性研究分析。研究假设为, 相比于低社交焦虑者, 高社交焦虑者会表现出更强的负性情绪的认知偏差并在情绪加工相关的脑区体现出特异性大脑活动及脑网络连接。



图 3　基于生物运动的社交焦虑者情绪加工与社会认知机制研究框架。

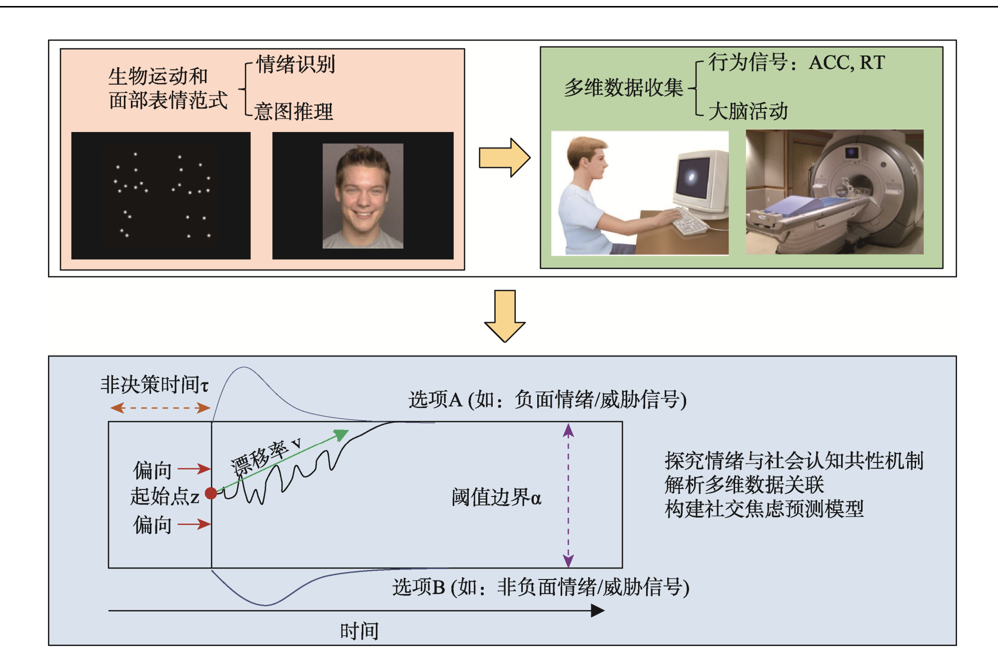


图 4 结合面部表情和生物运动范式，收集多维数据构建漂移扩散模型，解析社交焦虑背后的情绪与社会加工共性机制，构建预测模型。ACC：准确率；RT：反应时。

4.2 研究内容 2：社交焦虑者对于生物运动和面部表情的社会意图推理

研究 2 将在研究 1 的基础之上，基于行为和脑成像实验，采用相似的分析手段，系统地考察社交焦虑者在社会意图推理背后的认知神经机制。本研究的实验范式将基于双人的生物运动刺激展开社会意图推理的任务。研究假设为，相比于低社交焦虑，高社交焦虑者会表现出更强的对于负向社会意图的认知偏差，并在心理理论相关的脑区体现出特异性大脑活动及脑网络连接。

4.3 研究内容 3：社交焦虑跨任务多维数据相关性

研究 1 和研究 2 分别从情绪感知和社会意图推理两个视角探究社交焦虑障碍背后的认知与神经机制。研究 3 将结合研究 1 和研究 2 的行为及脑成像数据，探究多维数据的组间一致性，并建立对于社交焦虑临床症状的预测模型。

研究 3 数据汇集研究 1 和研究 2 中针对情绪加工和社会意图推理的认知行为数据、脑成像数据，以及被试的自我报告量表数据。基于情绪加工和社会意图推理的多维数据，我们将分别使用潜在因素模型(Peng, Knotts et al., 2021)，机器学习聚类算法和支持向量机回归算法分别从数据组间一致性、聚类分析和临床预测模型三个角度进行数据分析。

同时，我们将基于被试主观汇报的抑郁、焦虑及社交焦虑量表特质，探索不同精神疾病诊断类别之间的共性机制。

5 理论构建与创新

社交焦虑者在情绪加工和社会意图推理方面均存在异常，为验证精神疾病背后的多维度数据之间的关联提供了良好的研究视角。但国内外已有的研究证据尚无法有效统合社交焦虑者情绪加工和社会意图理解的共性机制，也缺乏基于多模态数据构建的临床预测模型。因此，本研究将采用经典的生物运动范式，综合运用行为实验、fMRI、临床量表、计算建模和机器学习，系统考察社交焦虑者的情绪识别和社会意图推理的负向认知偏差的共性认知神经机制，并构建社交焦虑的多模态数据预测模型。

(1) 为社交焦虑的认知偏差机制构建理论模型

本研究将在面部表情情绪识别范式的基础上，进一步采用经典的生物运动范式来构建情绪识别和社会意图推理任务。以往对于社交焦虑的认知偏向集中于面部表情识别任务(如：Heuer et al., 2010)，但社交焦虑者常常在社会场景避免直视他人面孔，而将注意力集中在非面孔区域。生物运动包含丰富的情绪和社会意图的信息，是社交焦

虑者判断他人情绪和意图的主要信息来源之一。因此，结合两种实验范式有助于对社交焦虑的情绪识别和社会意图推理的认知偏差过程进行探究。此外，基于计算建模手段，可量化社交焦虑在情绪和社会意图的认知偏向，有利于建立客观诊断指标。

(2) 基于社交焦虑探究情绪识别与社会意图的共性机制

社交焦虑的认知偏向具有多元性和复杂性。以本研究关注的情绪识别和社会意图为例，过往研究对单一领域进行了广泛的研究，但如何将两个领域已有研究结果整合起来，并不是简单的加法问题。Pessoa (2019)呼吁研究者关注情绪与认知的交互，拥抱复杂性。然而，现存的证据无法有效统合情绪加工和社会认知两个维度的共性机制。本研究利用生物运动加工的神经机制涉及情绪加工和社会认知等脑网络的特点，尝试以整合的视角探索情绪识别和社会意图的共性机制，并建立多种认知功能神经机制共性机制的探索流程。本研究将把生物运动范式与经典的面孔情绪识别范式相结合，同时引入经典社会意图推理的任务，进行多任务之间的社交焦虑加工机制的比较，以确立研究结果的泛化性。

(3) 构建社交焦虑的情绪识别和社会认知多模态数据

本研究将综合运用行为实验、fMRI、临床量表、计算建模和机器学习，系统考察社交焦虑者的情绪识别和社会意图推理的负向认知偏差的共性认知神经机制，并构建社交焦虑的多模态数据预测模型。本研究将推动精神疾病背后多模态数据之间关联的实证检验，以及我国基于神经生物学指标对于精神疾病的分类和诊断，有望引领未来基于行为和脑成像等多模态信号对精神疾病进行客观分类和预测，推动“健康中国2030”规划纲要中关于“到 2030 年，常见精神障碍防治和心理行为问题识别干预水平显著提高”的实现。

参考文献

Baur, V., Hänggi, J., Langer, N., & Jäncke, L. (2013). Resting-state functional and structural connectivity within an insula−amygdala route specifically index state and trait anxiety. *Biological Psychiatry*, *73*(1), 85−92.

Brühl, A. B., Delsignore, A., Komossa, K., & Weidt, S. (2014). Neuroimaging in social anxiety disorder—A meta-analytic review resulting in a new neurofunctional model. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *47*, 260−280.

Burklund, L. J., Craske, M. G., Taylor, S. E., & Lieberman, M. D. (2015). Altered emotion regulation capacity in social phobia as a function of comorbidity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *10*(2), 199−208.

Chen, J., Short, M., & Kemps, E. (2020). Interpretation bias in social anxiety: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Affective Disorders*, *276*, 1119−1130. https://doi.org/10.1016/j.jad.2020.07.121

Chouchourelou, A., Matsuka, T., Harber, K., & Shiffrar, M. (2006). The visual analysis of emotional actions. *Social Neuroscience*, *1*(1), 63−74. https://doi.org/10.1080/17470910600630599

Clark, D. M., & Wells, A. (1995). A cognitive model of social phobia. In R. G. Heimberg, M. R. Liebowitz, D. A. Hope, F. R. Schneier, R. G. Heimberg, M. R. Liebowitz, D. A. Hope, & F. R. Schneier (Eds.), *Social phobia: Diagnosis, assessment, and treatment* (pp. 69−93). New York: Guilford Press.

Claudino, R. G. E., de Lima, L. K. S., de Assis, E. D. B., & Torro, N. (2019). Facial expressions and eye tracking in individuals with social anxiety disorder: A systematic review. *Psicologia: Reflexao e Critica*, *32*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s41155-019-0121-8

Craig, A. D. (2009). How do you feel—now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(1), 59−70.

Cutting, J. E., & Kozlowski, L. T. (1977). Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *9*(5), 353−356.

Darwin, C. (1872). *The expression of the emotions in man and animals*. London: John Murray.

Dittrich, W. H., Troscianko, T., Lea, S. E. G., & Morgan, D. (1996). Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance. *Perception*, *25*(6), 727−738.

Eisenberg, I. W., Bissett, P. G., Zeynep Enkavi, A., Li, J., MacKinnon, D. P., Marsch, L. A., & Poldrack, R. A. (2019). Uncovering the structure of self-regulation through data-driven ontology discovery. *Nature Communications*, *10*(1), 2319.

Etkin, A., & Wager, T. D. (2007). Functional neuroimaging of anxiety: A meta-analysis of emotional processing in PTSD, social anxiety disorder, and specific phobia. *American Journal of Psychiatry*, *164*(10), 1476−1488.

Freitas-Ferrari, M. C., Hallak, J. E. C., Trzesniak, C., Santos Filho, A., Machado-de-Sousa, J. P., Chagas, M. H. N., …

Crippa, J. A. S. (2010). Neuroimaging in social anxiety disorder: A systematic review of the literature. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, *34*(4), 565−580.

Frey, R., Pedroni, A., Mata, R., Rieskamp, J., & Hertwig, R. (2017). Risk preference shares the psychometric structure of major psychological traits. *Science Advances*, *3*(10), e1701381.

Gentili, C., Cristea, I. A., Angstadt, M., Klumpp, H., Tozzi, L., Phan, K. L., & Pietrini, P. (2016). Beyond emotions: A meta-analysis of neural response within face processing system in social anxiety. *Experimental Biology and Medicine*, *241*(3), 225−237.

Gentili, C., Ricciardi, E., Gobbini, M. I., Santarelli, M. F., Haxby, J. V., Pietrini, P., & Guazzelli, M. (2009). Beyond amygdala: Default mode network activity differs between patients with social phobia and healthy controls. *Brain Research Bulletin*, *79*(6), 409−413.

Grossman, E. D., & Blake, R. (2002). Brain areas active during visual perception of biological motion. *Neuron*, *35*(6), 1167−1175. https://doi.org/10.1016/s0896-6273(02)00897-8

Grossman, E. D., Donnelly, M., Price, R., Pickens, D., Morgan, V., Neighbor, G., & Blake, R. (2000). Brain areas involved in perception of biological motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(5), 711−720. https://doi.org/10.1162/089892900562417

Han, B., Ji, S., Wang, J., Bao, H., & Jiang, X. (2021). An intelligent diagnosis framework for roller bearing fault under speed fluctuation condition. *Neurocomputing*, *420*, 171−180.

Hattingh, C. J., Ipser, J., Tromp, S. A., Syal, S., Lochner, C., Brooks, S. J., & Stein, D. J. (2013). Functional magnetic resonance imaging during emotion recognition in social anxiety disorder: An activation likelihood meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 347.

Heenan, A., & Troje, N. F. (2015). The relationship between social anxiety and the perception of depth-ambiguous biological motion stimuli is mediated by inhibitory ability. *Acta Psychologica*, *157*, 93−100. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.02.012

Heuer, K., Lange, W. G., Isaac, L., Rinck, M., & Becker, E. S. (2010). Morphed emotional faces: Emotion detection and misinterpretation in social anxiety. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, *41*(4), 418−425. https://doi.org/10.1016/j.jbtep.2010.04.005

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, *14*(2), 201−211.

Keane, B. P., Peng, Y., Demmin, D., Silverstein, S. M., & Lu, H. (2018). Intact perception of coherent motion, dynamic rigid form, and biological motion in chronic schizophrenia. *Psychiatry Research*, *268*, 53−59.

Kennedy, D. P., & Adolphs, R. (2012). The social brain in psychiatric and neurological disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(11), 559−572.

King, M. (2022). *Social chemistry: Decoding the patterns of human connection*. New York: Penguin.

Liu, H., Li, X., Han, B., & Liu, X. (2017). Effects of cognitive bias modification on social anxiety: A meta-analysis. *PloS One*, *12*(4), e0175107.

MacKinnon, D. F., & Rudolf, H.-S. (2003). Is there a common etiology for depression and anxiety? In S. Kasper, J. A. den Boer, & J, M. A. Sitsen (Eds.), *Handbook of depression and anxiety* (pp. 111−125). New York: CRC Press.

Montagne, B., Schutters, S., Westenberg, H. G. M., van Honk, J., Kessels, R. P. C., & de Haan, E. H. F. (2006). Reduced sensitivity in the recognition of anger and disgust in social anxiety disorder. *Cognitive Neuropsychiatry*, *11*(4), 389−401.

Mullins, D. T., & Duke, M. P. (2004). Effects of social anxiety on nonverbal accuracy and response time I: Facial expressions. *Journal of Nonverbal Behavior*, *28*(1), 3−33.

Nakao, T., Sanematsu, H., Yoshiura, T., Togao, O., Murayama, K., Tomita, M., … Kanba, S. (2011). fMRI of patients with social anxiety disorder during a social situation task. *Neuroscience Research*, *69*(1), 67−72.

Ousdal, O. T., Andreassen, O. A., Server, A., & Jensen, J. (2014). Increased amygdala and visual cortex activity and functional connectivity towards stimulus novelty is associated with state anxiety. *PloS One*, *9*(4), e96146.

Palomero-Gallagher, N., & Amunts, K. (2021). A short review on emotion processing: A lateralized network of neuronal networks. *Brain Structure and Function*, *277*(2), 673−684.

Peng, Y., Ichien, N., & Lu, H. (2020). Causal actions enhance perception of continuous body movements. *Cognition*, *194*, 104060.

Peng, Y., Knotts, J. D., Taylor, C. T., Craske, M. G., Stein, M. B., Bookheimer, S., … Paulus, M. P. (2021). Failure to identify robust latent variables of positive or negative valence processing across units of analysis. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, *6*(5), 518−526.

Peng, Y., Knotts, J. D., Young, K. S., Bookheimer, S. Y., Nusslock, R., Zinbarg, R. E., … Craske, M. G. (2023). Threat neurocircuitry predicts the development of anxiety and depression symptoms in a longitudinal study. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and*

Neuroimaging, 8(1), 102−110. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2021.12.013

Peng, Y., Lu, H., & Johnson, S. P. (2021). Infant perception of causal motion produced by humans and inanimate objects. *Infant Behavior and Development*, *64*, 101615.

Peng, Y., Thurman, S., & Lu, H. (2017). Causal action: a fundamental constraint on perception and inference about body movements. *Psychological Science*, *28*(6), 798−807.

Pessoa, L. (2019). Embracing integration and complexity: Placing emotion within a science of brain and behaviour. *Cognition and Emotion*, *33*(1), 55−60.

Pitcher, D., & Ungerleider, L. G. (2021). Evidence for a third visual pathway specialized for social perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *25*(2), 100−110.

Pollick, F. E., Paterson, H. M., Bruderlin, A., & Sanford, A. J. (2001). Perceiving affect from arm movement. *Cognition*, *82*(2), B51−B61.

Portugal, L. C. L., Alves, R. C. S., Junior, O. F., Sanchez, T. A., Mocaiber, I., Volchan, E., … Pereira, M. G. (2020). Interactions between emotion and action in the brain. *NeuroImage*, *214*, 116728.

Pozo, C., Carver, C. S., Wellens, A. R., & Scheier, M. F. (1991). Social anxiety and social perception: Construing others' reactions to the self. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *17*(4), 355−362.

Rapee, R. M., & Heimberg, R. G. (1997). A cognitive-behavioral model of anxiety in social phobia. *Behaviour Research and Therapy*, *35*(8), 741−756.

Silvia, P. J., Allan, W. D., Beauchamp, D. L., Maschauer, E. L., & Workman, J. O. (2006). Biased recognition of happy facial expressions in social anxiety. *Journal of Social and Clinical Psychology*, *25*(6), 585−602.

Stein, M. B., & Stein, D. J. (2008). Social anxiety disorder. *The Lancet*, *371*(9618), 1115−1125. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)60488-2

Thurman, S. M., & Lu, H. (2014). Perception of social interactions for spatially scrambled biological motion. *PloS One*, *9*(11), e112539.

Thurman, S. M., & Lu, H. (2016). Revisiting the importance of common body motion in human action perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *78*(1), 30−36.

Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: A framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Vision*, *2*(5), 371−387.

Tsang, V. (2018). Eye-tracking study on facial emotion recognition tasks in individuals with high-functioning autism spectrum disorders. *Autism*, *22*(2), 161−170. https://doi.org/10.1177/1362361316667830

van Bockstaele, B., Verschuere, B., Tibboel, H., De Houwer, J., Crombez, G., & Koster, E. H. W. (2014). A review of current evidence for the causal impact of attentional bias on fear and anxiety. *Psychological Bulletin*, *140*(3), 682−721.

van Boxtel, J. J. A., Peng, Y., Su, J., & Lu, H. (2017). Individual differences in high-level biological motion tasks correlate with autistic traits. *Vision Research*, *141*, 136−144. https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.11.005

van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: A meta-analysis. *Neuroimage*, *48*(3), 564−584.

Weightman, M. J., Air, T. M., & Baune, B. T. (2014). A review of the role of social cognition in major depressive disorder. *Frontiers in Psychiatry*, *5*, 179.

Yiltiz, H., & Chen, L. (2018). Emotional cues and social anxiety resolve ambiguous perception of biological motion. *Experimental Brain Research*, *236*(5), 1409−1420. https://doi.org/10.1007/s00221-018-5233-3

Yuan, C., Zhu, H., Ren, Z., Yuan, M., Gao, M., Zhang, Y., … Zhang, W. (2018). Precuneus-related regional and network functional deficits in social anxiety disorder: A resting-state functional MRI study. *Comprehensive Psychiatry*, *82*, 22−29.

Zeng, Y., Zhao, Y., Zhang, T., Zhao, D., Zhao, F., & Lu, E. (2020). A brain-inspired model of theory of mind. *Frontiers in Neurorobotics*, *14*, 60.

The mechanism of emotion processing and intention inference in social anxiety disorder based on biological motion

PENG Yujia[1,2,3], WANG Yuxi[1], LU Di[1]

([1] *School of Psychological and Cognitive Sciences, Beijing Key Laboratory of Behavior and Mental Health, Peking University*; [2] *Institute for Artificial Intelligence, Peking University, Beijing* 100871, *China*) ([3] *National Key Laboratory of General Artificial Intelligence, Beijing Institute for General Artificial Intelligence (BIGAI), Beijing* 100080, *China*)

Abstract: Social anxiety disorder (SAD) is associated with abnormal features in both emotion processing and social intention inference. However, there is a lack of research and clinical predictive models for the common mechanisms of emotion processing and social intention inference underlying social anxiety. The current project aims to use a combination of behavioral experiments, functional magnetic resonance imaging, and computational modeling to systematically examine the mechanisms of negative cognitive biases in SAD. Based on classic biological motion paradigms targeting emotion processing and social intention inference, combining the facial expressions, we aim to establish predictive models of SAD clinical symptoms based on multi-dimensional data. This project has the prospect of revealing the psychopathology underlying SAD, examining the association between behavioral and neuroimaging data underlying mental disorders, and promoting objective classification and prediction of mental disorders.

Keywords: emotion perception, social anxiety, social intention inference, biological motion, brain imaging, cognitive modeling